

理論から実証へ： 水再生技術の開発と評価

2020年1月14日

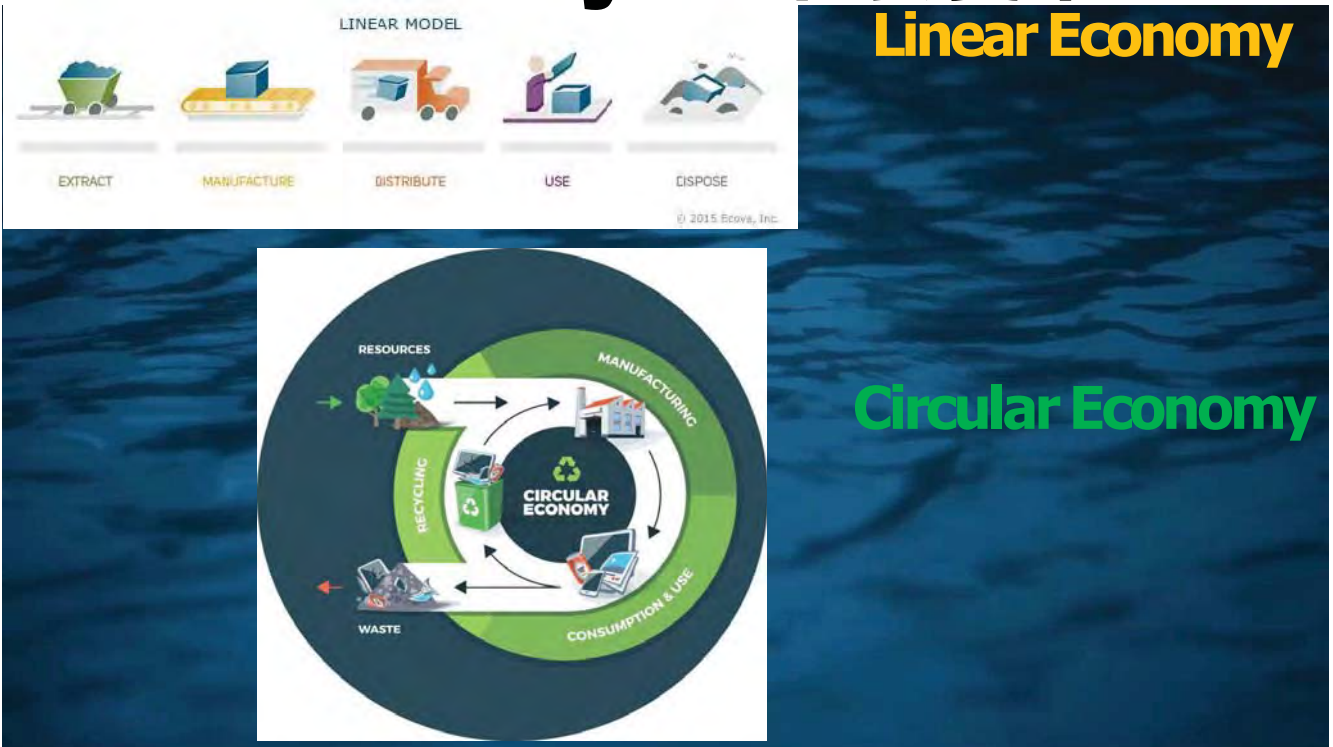
京都大学大学院工学研究科
附属流域圏総合環境質研究センター
教授 田中 宏明, PhD, PE



Outline

- 世界的に高まる水の再利用
- 水の再利用のリスクとエネルギー管理
- 水の再利用を必要とする沖縄

Linear からCircular Economyへの社会変革

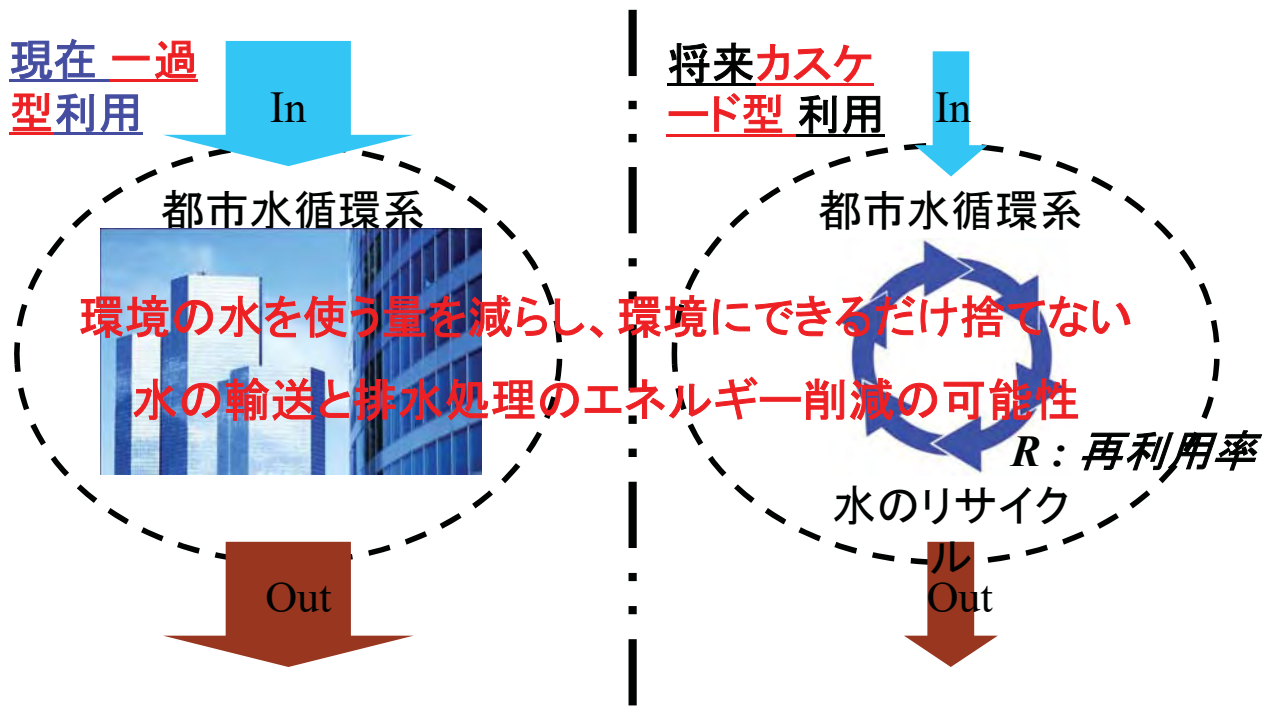


国連 持続可能な開発目標 2015. 9. 17 4



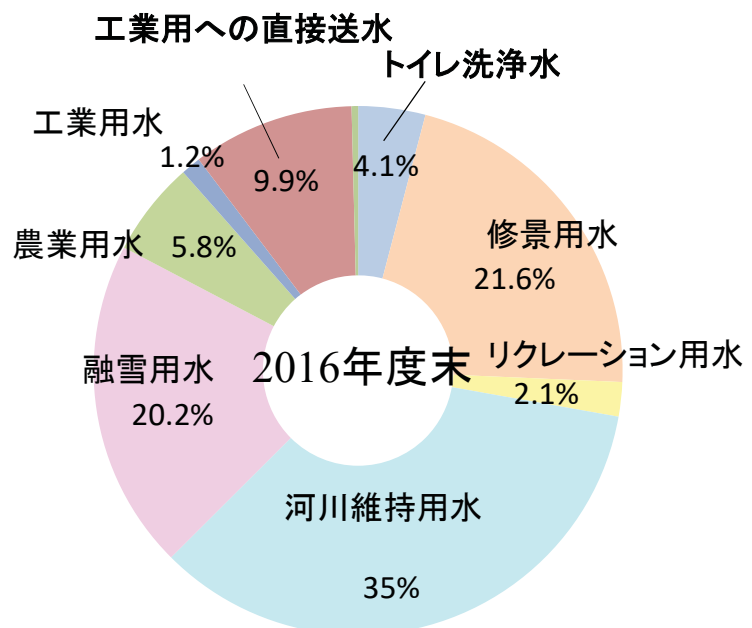
- 目標6: 全ての人々に水と衛生へのアクセスと持続可能な管理を確保**
- 2015年の時点で、25億人はトイレなど衛生設備を利用できず、**80%の廃水は未処理で環境へ放流**
 - 2030までに全ての人に飲料水と衛生設備、**未処理廃水を半分に**
 - 世界中での水のリサイクル率を上げ、安全な水の再利用を実現する**

水の再利用は取水量 と排水量を削減

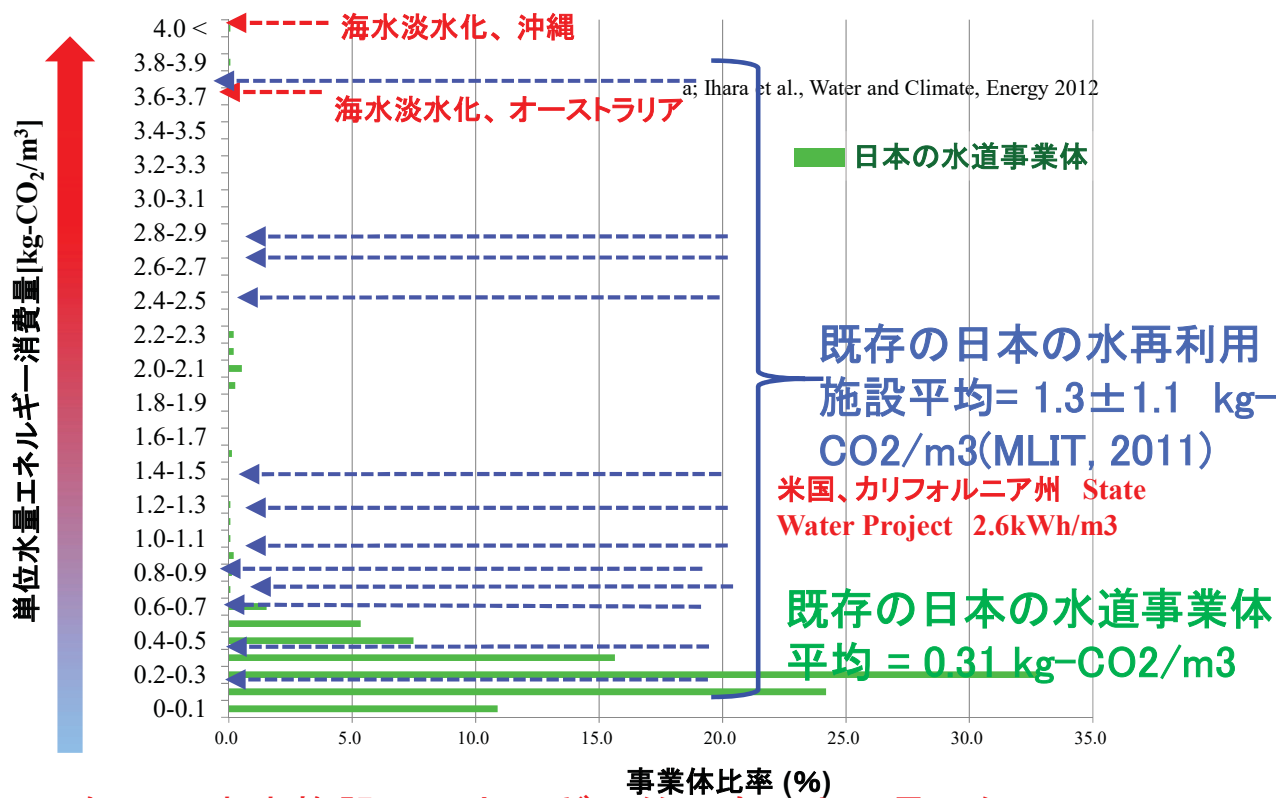


日本の下水再生水利用状況

- 再利用率 **1.3%** (FY2015)
- 下水処理水量 **14.7** billion m³ / year
- 再生水利用料 **0.21** billion m³ / year



日本の水道施設の単位水量のエネルギー消費量⁷



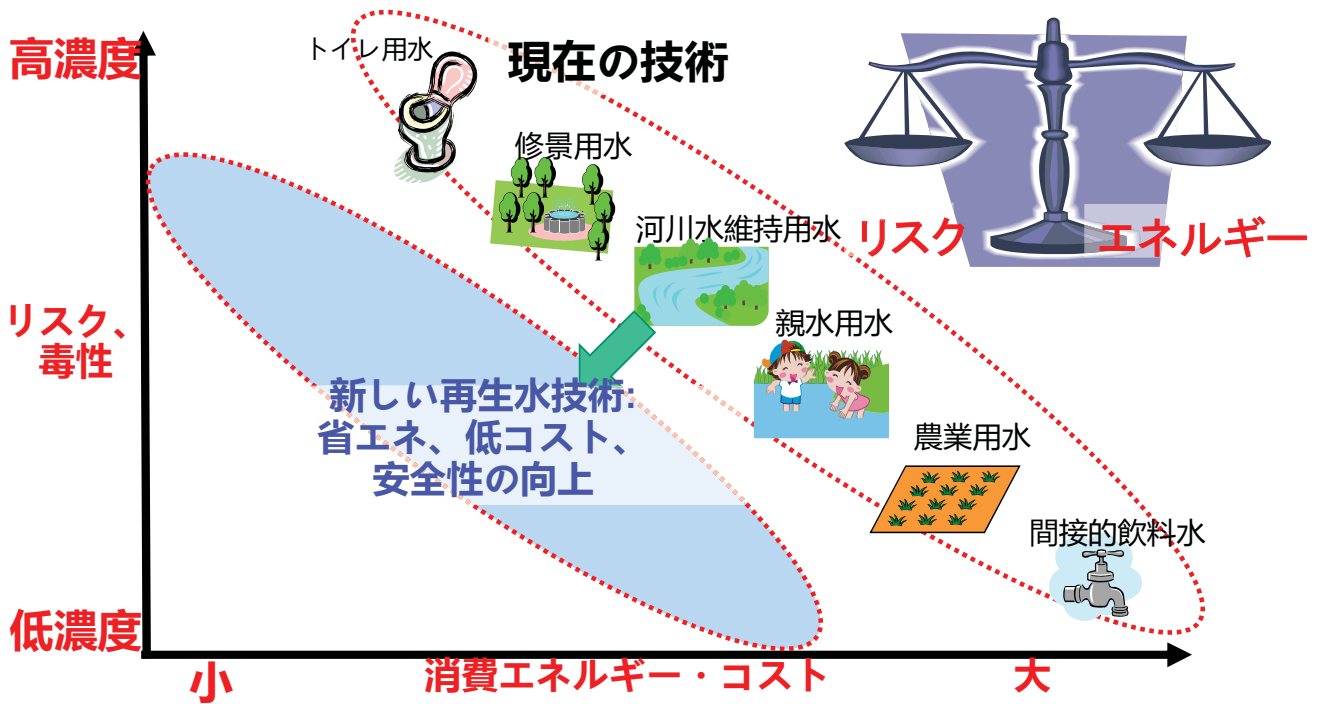
既存の再生水施設はエネルギー的に有利とは言えない
水の再利用計画や技術が不適切？

日本の再生水利用における水質基準について

- 「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」(国土交通省事務連絡)

基準項目	基準適用箇所	水質基準	散水用水	修景用水	親水用水
大腸菌		不検出	不検出	大腸菌群数として 1000CFU/100mL	不検出
濁度	再生処理施設出口	[管理目標値] 2度以下	[管理目標値] 2度以下	[管理目標値] 2度以下	2度以下
pH		5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6	5.8~8.6
外観		不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
色度		— (注2)	—	40度以下	10度以下
臭気		不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと	不快でないこと
残留塩素	責任分界点	[管理目標値] 遊離残留塩素0.1mg/L 又は結合残留塩素 0.4mg/L以上	[管理目標値] 遊離残留塩素0.1mg/L 又は結合残留塩素 0.4mg/L以上	[管理目標値] 遊離残留塩素0.1mg/L 又は結合残留塩素 0.4mg/L以上	[管理目標値] 遊離残留塩素0.1mg/L 又は結合残留塩素 0.4mg/L以上
施設基準		砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること	集沈殿+砂ろ過施設又は同等以上の機能を有する施設を設けること

【備考】 (注2) 利用者の意向等を踏まえ、必要に応じて基準値を設定
(注3) 生態系保全の観点から塩素消毒以外の処理を行う場合がある。触れることを前提としない利用であるため規定しない

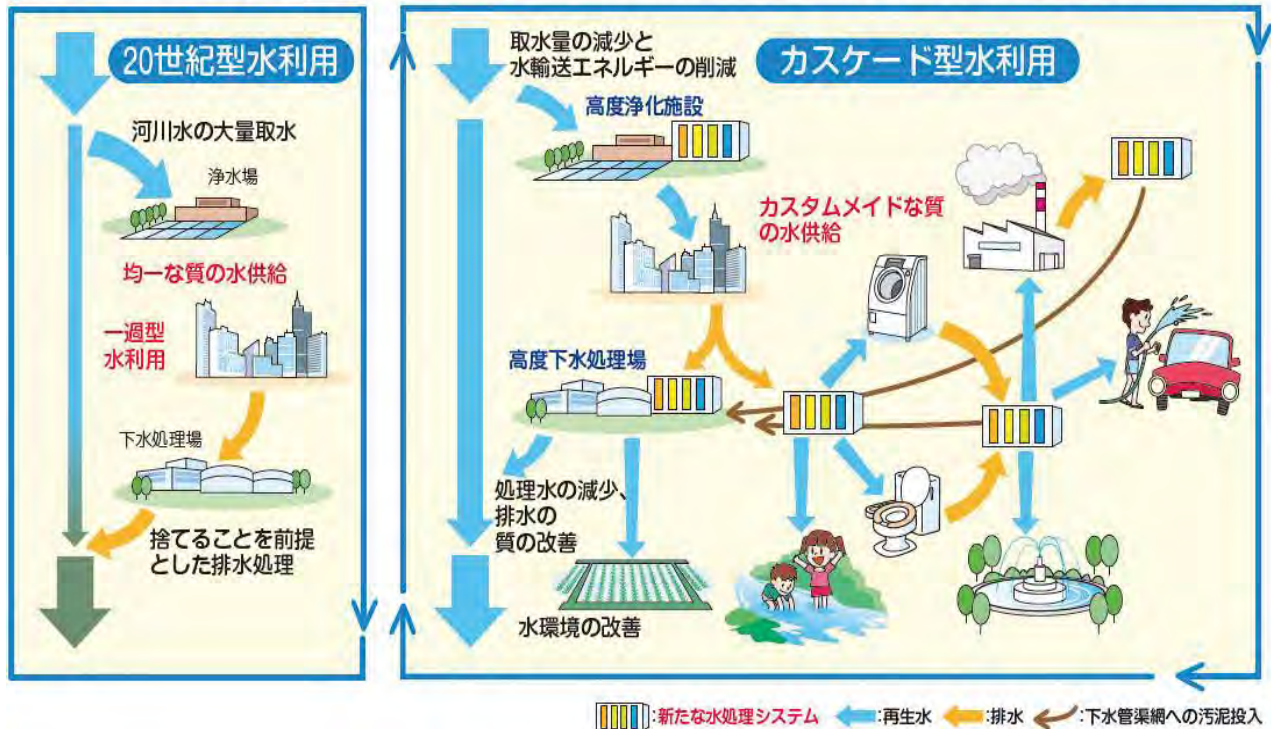


- 安全性確保とエネルギー/コストはトレードオフ: Fit-on-purpose
- 水輸送を含むエネルギー/コストの最適化、再生水技術開発

Outline

- 世界的に高まる水の再利用
- 水の再利用のリスクとエネルギー管理
- 水の再利用を必要とする沖縄

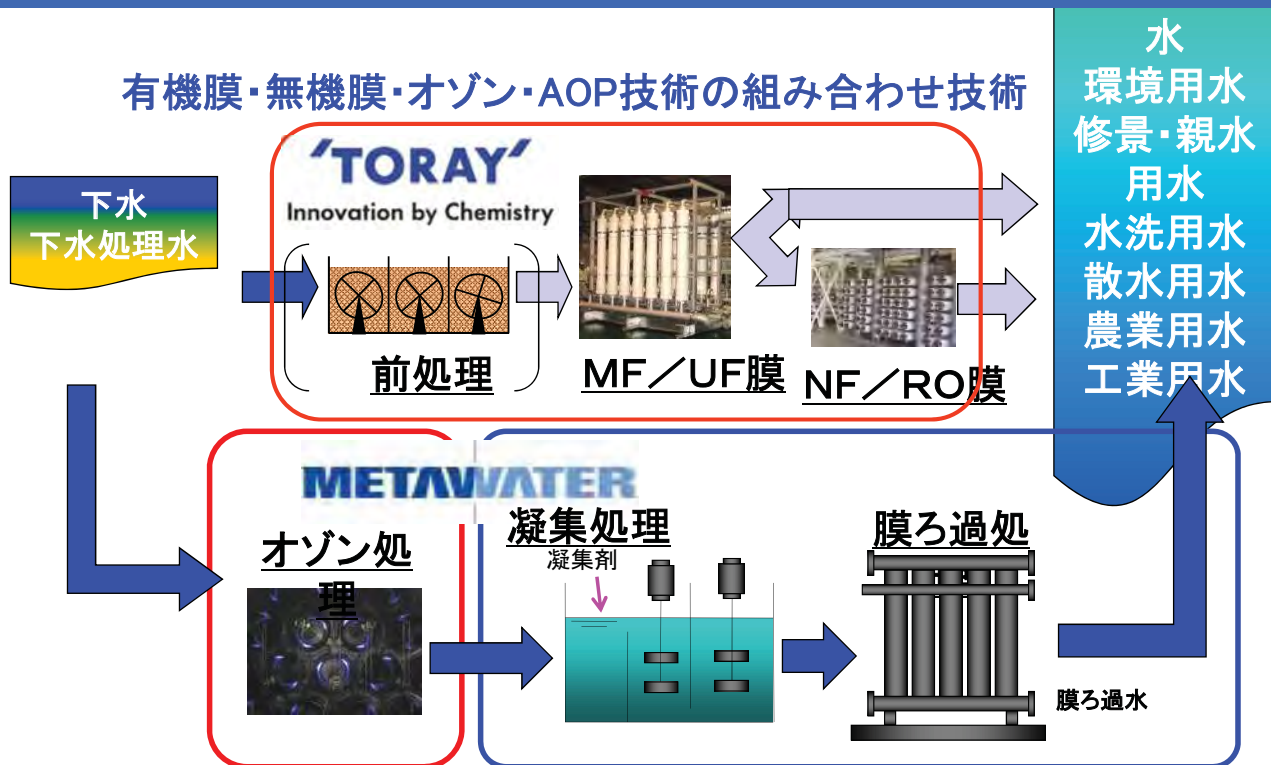
再生水に含まれるウイルス、微量汚染物質などリスク要因を制御する分離膜などの水処理技術を開発し、そのエネルギー、リスク抑制性を明らかにし、国内外に導入した場合の安全性、エネルギー、環境面からカスケード利用型都市水循環システムを評価する。

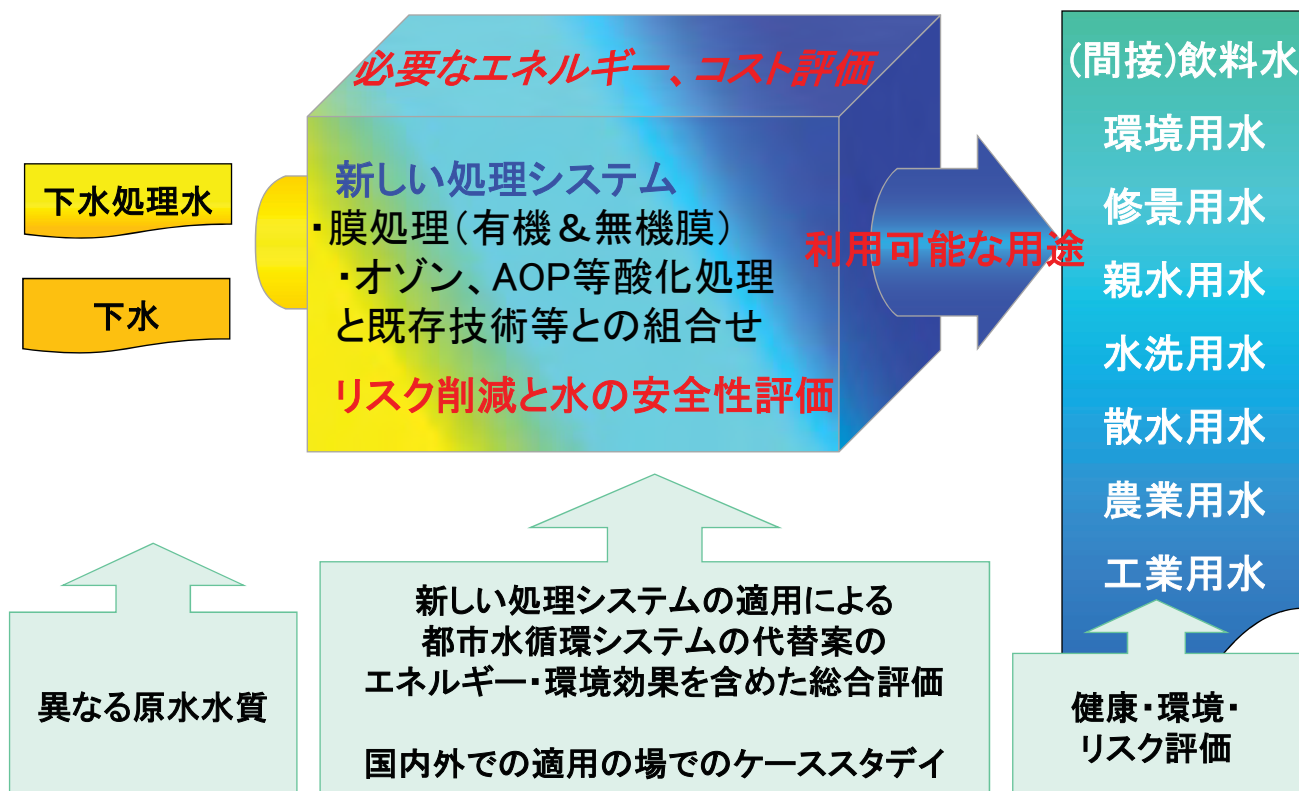


新たな水処理技術の開発による一過型からカスケード型水利用への変換
取水排水を減らし、環境負荷を軽減する都市水循環システム

新しい水処理システムの開発

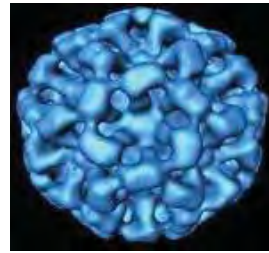
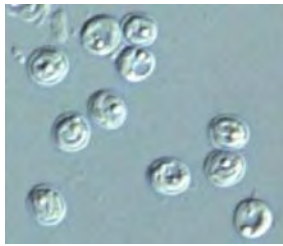
有機膜・無機膜・オゾン・AOP技術の組み合わせ技術





これまで指標細菌で水質管理でされてきたが

クリプトスポリジウムやウイルスの安全性が保障されるか?



定量的微生物リスク評価(QMRA)で水再利用シナリオごとに再生水に含まれる微生物の感染リスク推定

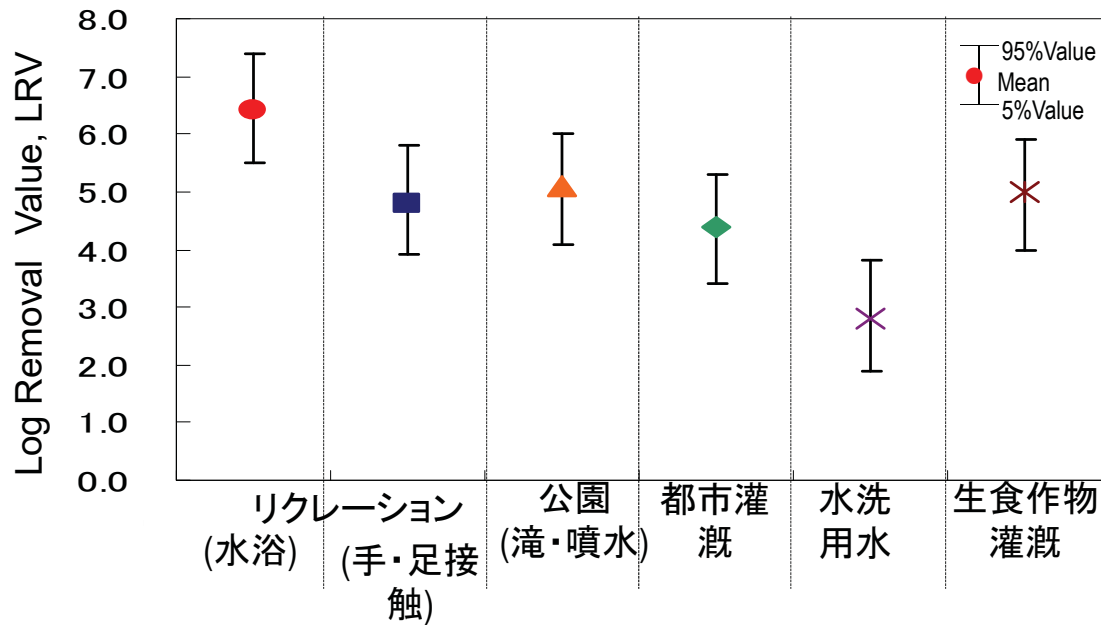
- ・病原微生物種
- ・病原微生物曝露量
- ・曝露頻度

リスク管理

許容/耐容リスク

- **USEPA** : 10^{-4} /人/年 (pppy)を水道水での許容レベルと設定(1988)
- **WHO・Australia**水再利用は 10^{-6} DALYs pppy を耐容レベルと設定(2006)
 - DALYs = Disability Adjusted Life Years
=YLDs(Years Lived with Disability) +
YLLs(Years of life lost)
- 処理や利用方法での**病原微生物ごとの削減必要**レベルは定量的に推定可能

水の再利用で 10^{-6} DALYs pppyのWHO耐容レベルを満たす¹⁷ 下水処理水中のウイルス削減レベルの推定



*Log-removal value:

(Yasui et al. 2012)

$LRV = \text{Log}_{10}(\text{source water concentration} / \text{process water concentration})$

国土交通省の下水処理水中のノロウイルスの測定結果に基づく

再生水に含まれる化学物質のヒト健康リスクの評価

18

PRTR第一種指定化学物質のヒト健康リスクの評価

一次評価
(全国データによる初期評価)

全国を対象に濃度を推計
157物質 (H20年度データ)
209物質 (H23年度データ)

毒性値と比較
122物質を評価 (H20年度、H23年度)

利用用途	PEC / 許容濃度 > 1 となる物質	備考
二次処理水の直接飲用 (高リスクシナリオ)	2物質 ヒドラジン、1,3-ジクロロ-2-プロパノール	H20年度データ
	2物質 グルタルアルデヒド、モリブデン及びその化合物	H23年度データ
農業利用 (根菜類への蓄積を評価)	0物質	H20年度データ

二次評価
(沖縄県での評価)

沖縄県を対象に209物質 (H23年度データ)
の濃度を推計

82物質を評価

利用用途ごとの曝露シナリオに基づいて、摂取量を設定して評価

利用用途	PEC / 許容濃度 > 1 となる物質	備考
都市利用 (水洗、洗車、修景、 親水(手足、水浴))	0物質	H23年度データ
農業利用 (農業従事者、根菜類の摂取)	0物質	H20年度データ

(岡本他、2014)

再生水に含まれる化学物質の水生生態系への影響評価

PRTR第一種指定化学物質の生態リスクの評価（全国）

生態リスクの評価

PEC / PNEC > 1 となる物質

予測無影響濃度（PNEC）と比較 122物質（H20年度）、144物質（H23年度）

9物質（H20年度）： 界面活性剤（AE、DDNO、NPE）、ヒドラジン、ヒドロキノン、ホルムアルデヒド、o-トルイジン、亜鉛の水溶性化合物、フェニトロチオン

18物質（H23年度）： 界面活性剤（AE、DDNO、LAS、NPE）、ヒドラジン、ヒドロキノン、ホルムアルデヒド、亜鉛とその化合物、コバルトとその化合物、ピリジン、2-アミノエタノール、N,N-ジシクロヘキシルアミン、セレンおよびその化合物、クロムおよびその化合物、鉛化合物、マンガンおよびその化合物、ジブロモクロロメタン、グルタルアルデヒド

医薬品類による生態リスクの評価（全国）

二次処理水に直接曝露

PEC とPNEC：既往の国内調査結果（文献値）から推定

PEC / PNEC > 1 となる物質を調査

9物質： クラリスロマイシン、アジスロマイシン、レボフロキサシン、トリクロサン、ケトプロフェン、エリスロマイシン、ロキシスロマイシン、プロプラノロール

（岡本他、2014）

UF・CM膜をコアにした再生水システムのリスク制御性とエネルギー²⁰

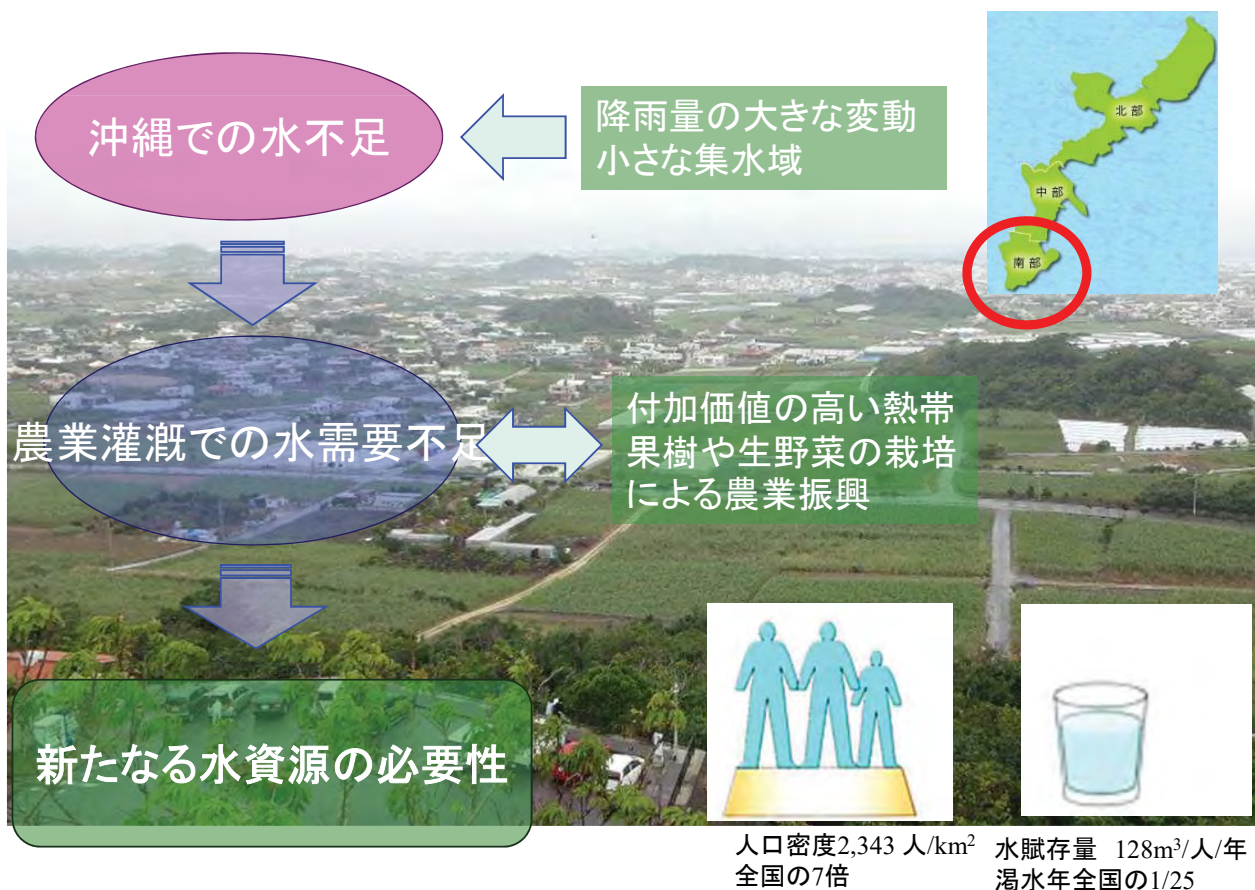
		処理性能								消費エネルギー (単位: kg-CO ₂ /m ³)※	
		大腸菌 大腸菌群	ウイルス (ファージ)	PPCPs EDCs	PFCs	エストロゲン 様作用	抗エストロ ゲン作用	水生生物 への毒性	DBPs	CO ₂ 排出量	計算規模 (m ³ /日)
二次処理水	⇒ UF ⇒	◎	△	×	×	×	◎	×	◎	◎	5,000
	⇒ 凝集 + UF ⇒	◎	○	×	×	×	◎	○	◎	◎	5,000 P
	⇒ 低pH凝集 + UF ⇒	◎	◎	×	×	×	◎	○	◎	◎	5,000 P
	⇒ UF + UV ⇒	◎	◎	×	×	×	◎	○	◎	◎	5,000 U
	⇒ UF + NF ⇒	◎	◎	○	○	○	◎	◎	◎	◎	5,000
	⇒ UF + RO ⇒	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	5,000
	⇒ O ₃ ⇒	◎	◎	◎	×	△	◎	○	△	◎	8,000 O ₃
	⇒ 凝集 + CM ⇒	◎	○	△	×	-	-	◎	◎	◎	8,000 F
	⇒ O ₃ + 凝集 + CM ⇒	◎	◎	◎	×	△	◎	◎	△	○	8,000 P
	⇒ 凝集 + CM + O ₃ ⇒	◎	◎	◎	-	-	-	-	△	○	8,000 PA
未生物処理水 (1次処理水)	⇒ 凝集 + UF ⇒	◎	○	×	×	○	◎	○	◎	◎	1,824 P _F
	⇒ 凝集 + UF + NF/RO ⇒	◎	-	◎	-	-	-	-	◎	-	-
	⇒ 凝集 + CM ⇒	◎	○	×	×	-	-	-	◎	○	1,824 F
	⇒ 凝集 + CM + O ₃ ⇒	◎	◎	◎	×	-	-	-	△	△	1,824 P _F

略称：CM(セラミック膜), PPCPs(医薬品類), EDCs(エストロゲン類), PFCs(有機フッ素化合物), DBPs(消毒副生成物)
 DBP以外：◎：高い除去率、○：中程度の除去率、△、低い除去率、×：除去が期待できない
 ◎：ほとんど生成しない、△条件次第では生成する
 ※ 0.42 kg-CO₂/m³：沖縄県北谷浄水場の電力に係るCO₂排出量（2009年度） 0.72 kg-CO₂/m³：既存の再生水処理施設(生物膜ろ過+オゾン)の維持管理に係るCO₂排出量
 1.16 kg-CO₂/m³：沖縄県企業局の水道施設全体の電力に係るCO₂排出量（2009年度） ◇出典：2011環境報告書(平成22年度決算版) 沖縄県企業局

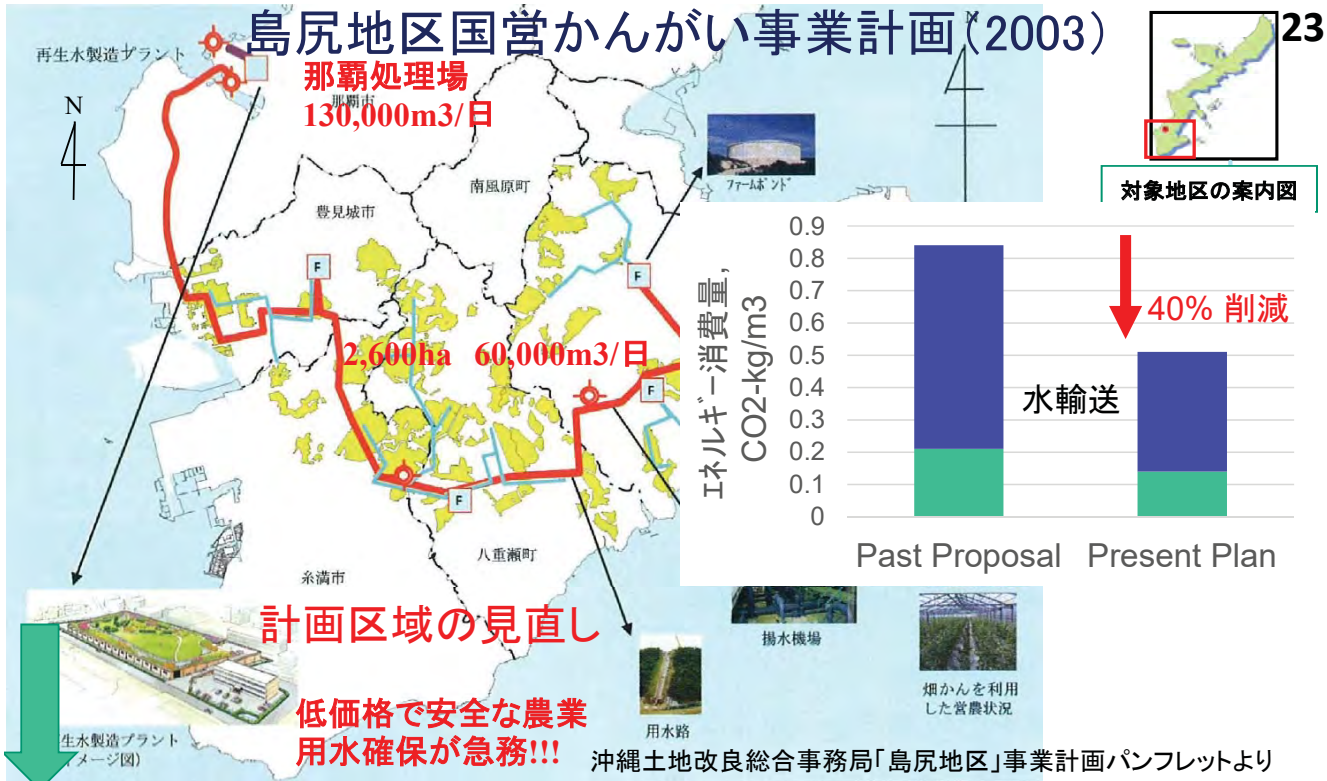
Outline

- 世界的に高まる水の再利用
- 水の再利用のリスクとエネルギー管理
- **水の再利用を必要とする沖縄**

沖縄本島南部での農業用水事情



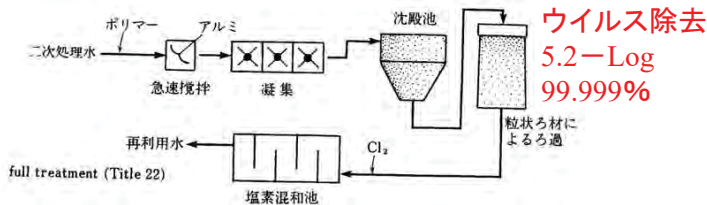
島尻地区国営かんがい事業計画(2003)



計画区域の見直し

低価格で安全な農業用水確保が急務!!!

沖縄土地改良総合事務局「島尻地区」事業計画パンフレットより

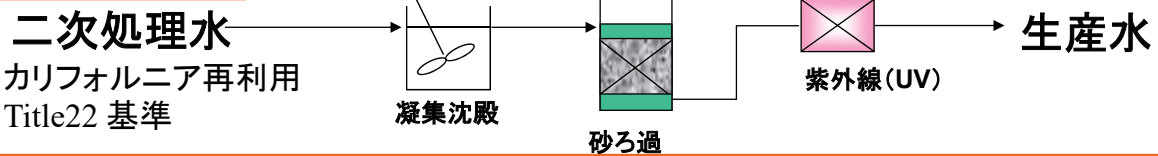


2009年に国営かんがい事業中断。
 要因①: 地下ダム水よりコスト高
 要因②: 安全性の風評被害懸念

開発する再生処理技術

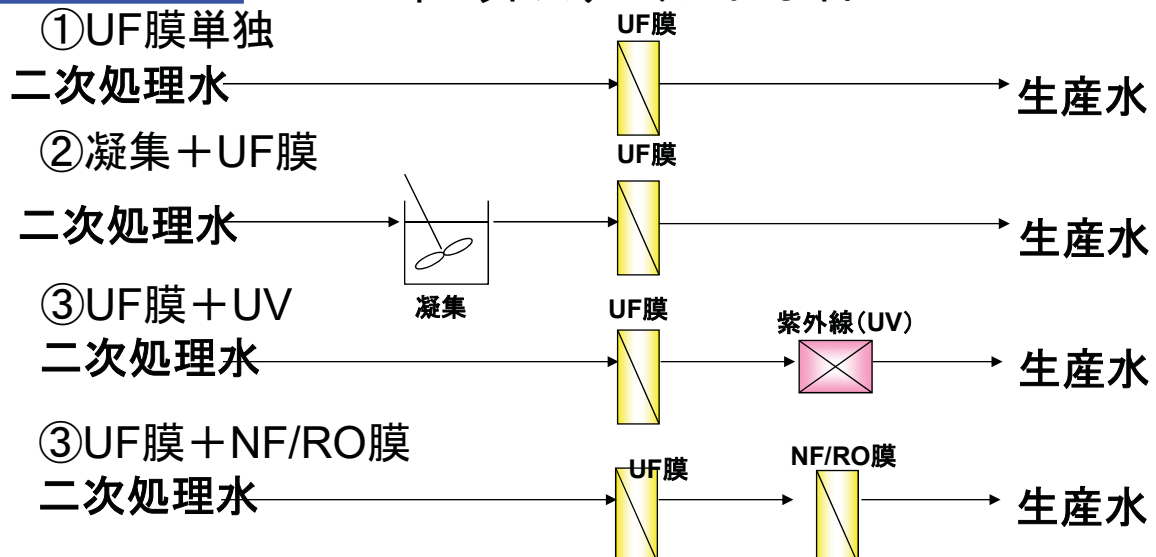
暫定目標達成に向け以下のプロセスの性能評価を実施

従来技術



膜処理技術

パイロットスケール10m³/日



Coagulation
UF



UV



NF/RO



様々な再生水用途ごとに定量的リスク評価

■ WHO は 障害調整生存年数 10^{-6} (DALYs pppy) を飲料水、農業灌漑で耐容できると仮定している

○: DAYLpppy $\leq 10^{-6}$

X: DAYLpppy $> 10^{-6}$

JST CREST Report(2015)

	エネルギー消費※	生食作物灌漑	Urban Water			
		消費者耕作者	トイレ洗浄用水	芝生灌漑	リクレーション水(手足)	リクレーション水(水浴)
二次処理水	◎	X	X	X	X	X
凝集 + UF	○	X	○	○	X	X
UF + UV	◎	○	○	○	○	X
UF + NF	△	○	○	○	○	○
UF + RO	X	○	○	○	○	○
凝集 + 砂ろ過 + UV(Title22)	○	○	○	○	○	X

※◎:エネルギー消費無,○:エネルギー消費小,△:エネルギー消費中,X:エネルギー消費大

下水処理水の再生処理システム図

糸満市に施設 農業用水に活用

来年2月実証研究

「糸満市」糸満市を拠点とし、糸満市農業の発展を目的として、下水処理水の再生処理施設を建設し、糸満市農業に活用する。この施設は、糸満市浄化センターから送られる下水処理水を、ろ過する膜（逆浸透膜）でろ過し、浄化された水を貯留タンクに貯留する。この水を、糸満市農業に活用する。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。

Okinawa Times 2015.8.19

再生水 農業振興に期待

糸満市で実証プラント

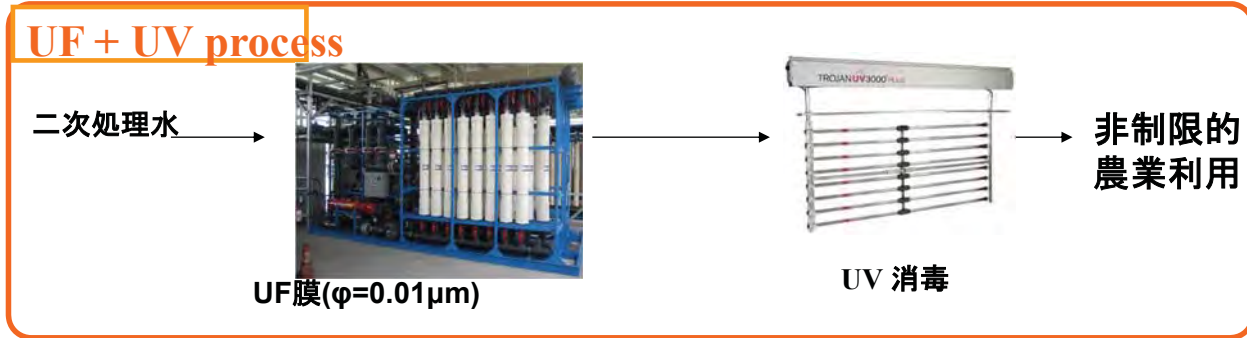
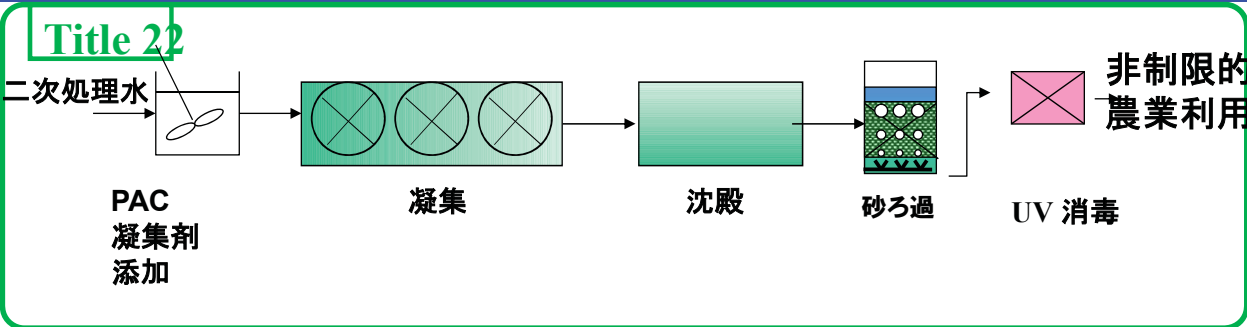
循環型社会へ本格稼働

糸満市で実証プラントが本格稼働し、再生水が農業に活用される。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。

News Article 2016.3.3 Okinawa Shinpo



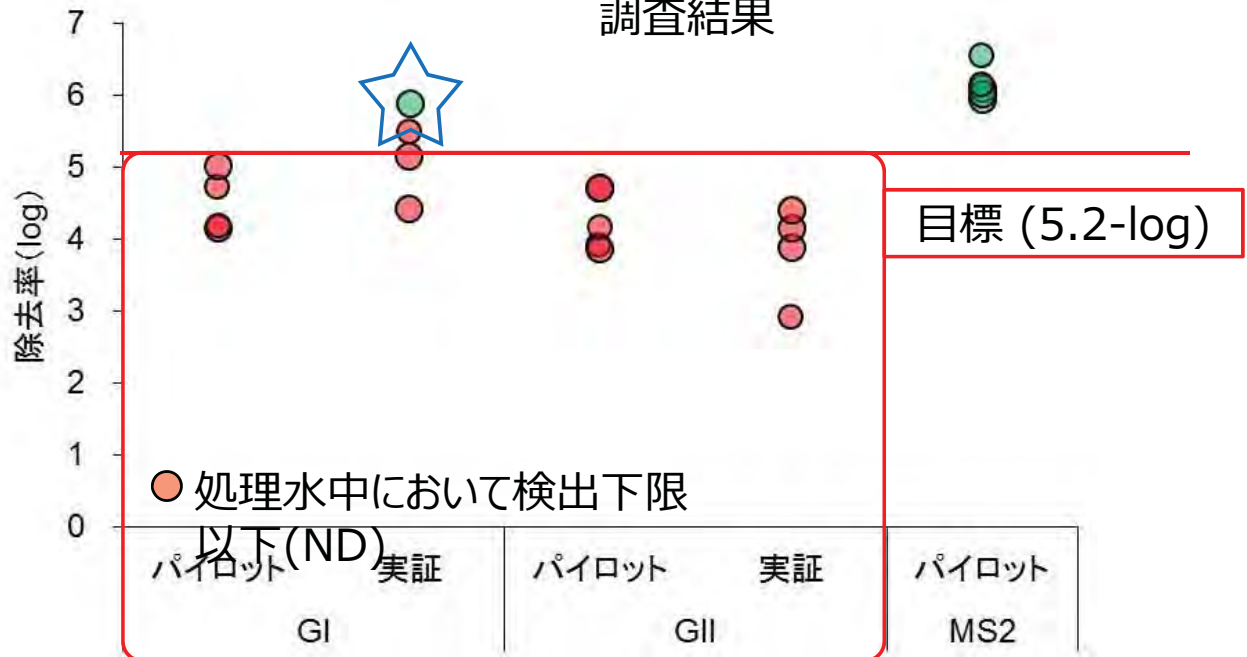
糸満市で実証プラントが本格稼働し、再生水が農業に活用される。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。この施設は、糸満市農業の発展を目的として、糸満市農業に活用する。



- Small Footprint, High Removal Efficiency and Reliability**
- LRV of Virus(≥5.2-Log) と低コストであることを実証する
 - UF + UV システムの信頼性を実証する

□ ウイルス除去性能評価の結果

※2016年1月～2017年1月
調査結果

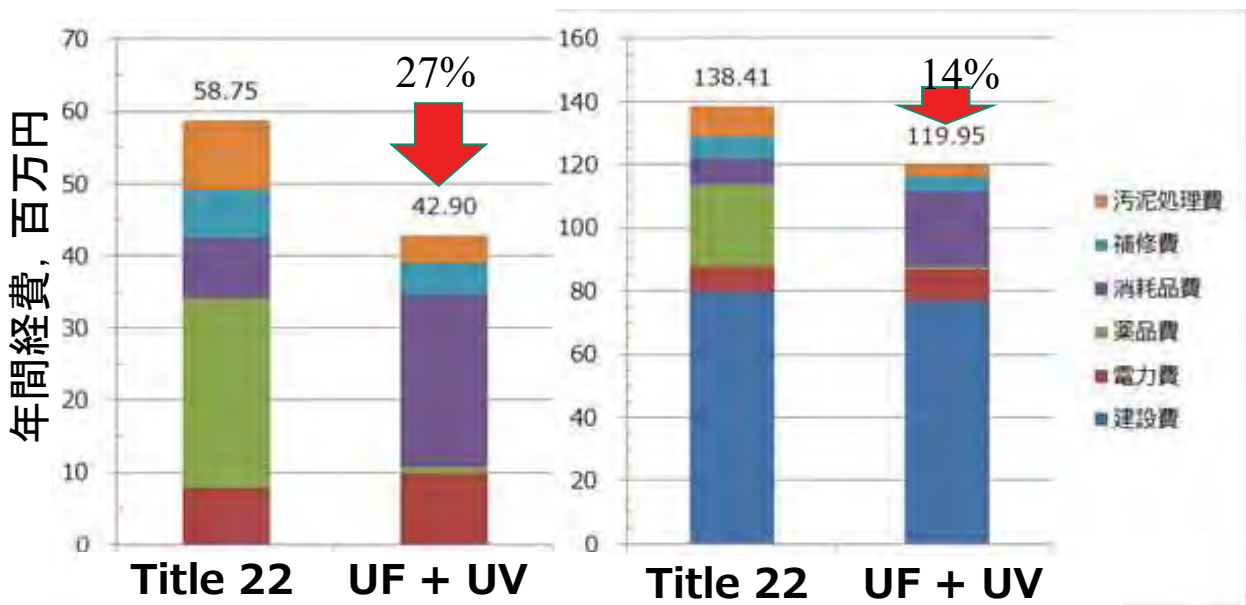


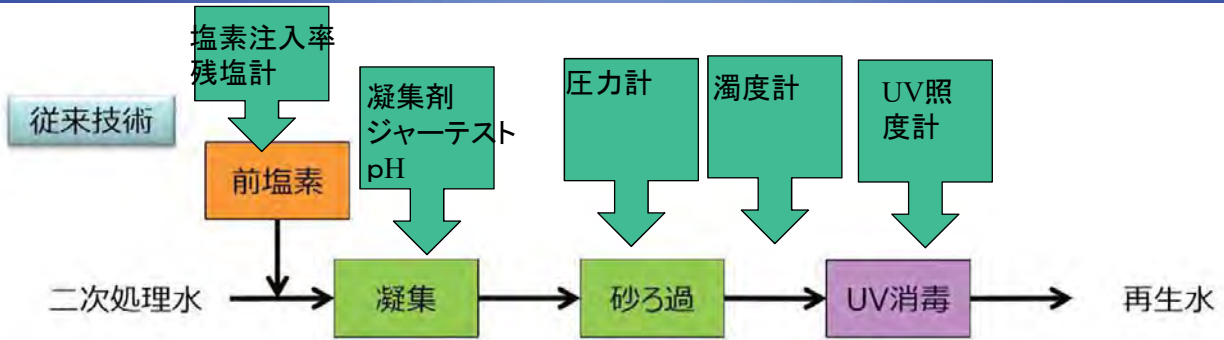
- ✓ パイロット及び実証の処理水中においてほとんどがND
- ✓ 原水濃度が高かったGIタイプ (実証) で5.2-log以上を達成

実証プラントからのフルスケール (10,000m³/d)の³⁰ 運転管理コストとLCコストの推定

□ O&M Cost

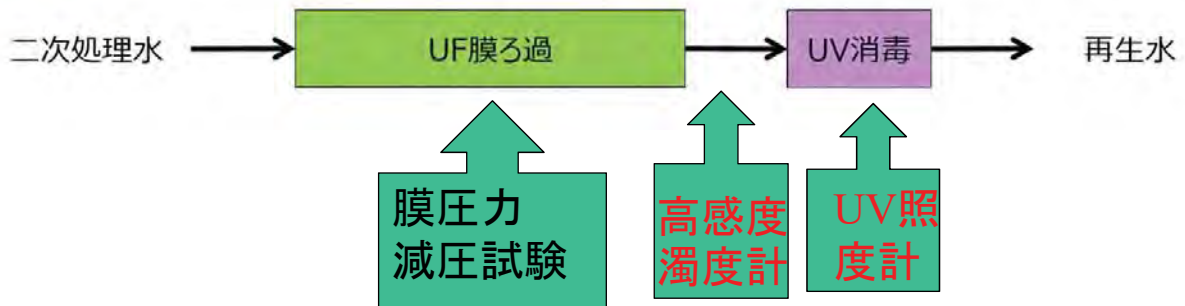
□ Life Cycle Cost





重要管理点の自動監視で省人化信頼向上
→水質測定回数の削減によるコスト削減

実証技術



■ 膜破断(0.01%)時の検出実証PDT試験と高感度濁度計で検出可能

農家の意見

再生水タンク



栽培実験に協力してくれている農家の眞境名さん



現状



農地排水溝から取水

- 再生水利用の節減効果(4万円/10a/年)
 - 水運搬、肥料、農薬、散水チューブ
 - 想定される再生水単価で、生食用作物栽培
- 再生水導入による収益増
 - レタス・トマト 37万円/10a/年→42万円/10a/年(13%増)
- 安定した水供給による増産と高収入作物への転換を想定すると、さらに増収

糸満市の再生水野菜 消費者の購買意欲

三輪他(2017)をもとに作成

(1) 再生水事業の説明

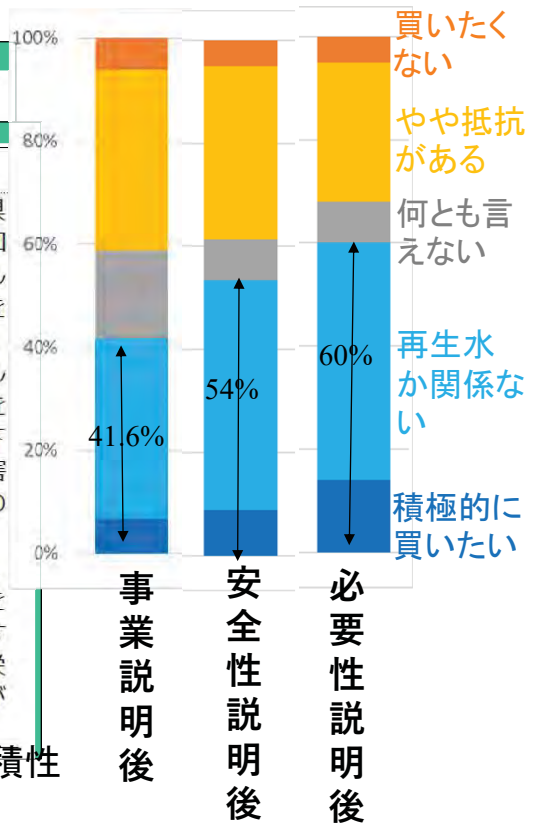
(2) 再生水の安全性の説明

(3) 再生水の意義・必要性の説明

【水不足】 沖縄県は水供給が限られている地域ですが、沖縄県民一人当たりの水消費量は全国トップです。年々観光客も増加しており、県は2030年には深刻な水不足が生じるという予測をしています。再生水を農業で利用することで、利用可能な生活水を確保し、将来のわたしたちの暮らしを守ることが期待されています。

【生き物】 私たちは沖縄北部の水を引き、生活用水として利用しています。そのため、川や森にすむ生き物たちに少なからず影響を与えています。また海には豊かなサンゴ礁が多くみられますが、下水処理水をそのまま海に流すと、海が富栄養化しサンゴにも被害をもたらします¹。下水処理水を再生水として利用すれば沖縄の様々な生き物たちを守ることができます。

【農業】 沖縄本島南部の農業は慢性的な水不足状態です。再生水が使えるようになると、本島南部の農家が安定的に野菜をつくるできるようになり、沖縄における野菜の地産地消がすすみます。また、再生水には、農業に必要なチッソやリン加里などの栄養素が含まれているため、農家は畑にまく化学肥料を減らすことができます。

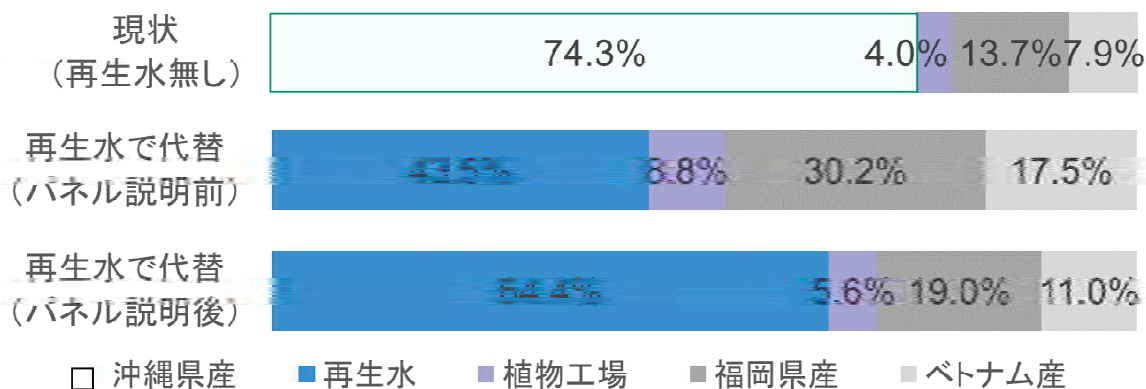


消費者は、専門家の心配する病原微生物よりも蓄積性のある化学物質を心配していた

JA沖縄の直売所との連携による販売実験



地元市民は、地場ものを求めている。情報を与えた上で**再生水**に代替すると、**市場シェアはほぼ変わらない**



由藤他(2017)をもとに作成



再生水ビデオ



実証施設の見学



再生水での作物栽培農場見学



給食センタースタッフ



小学生

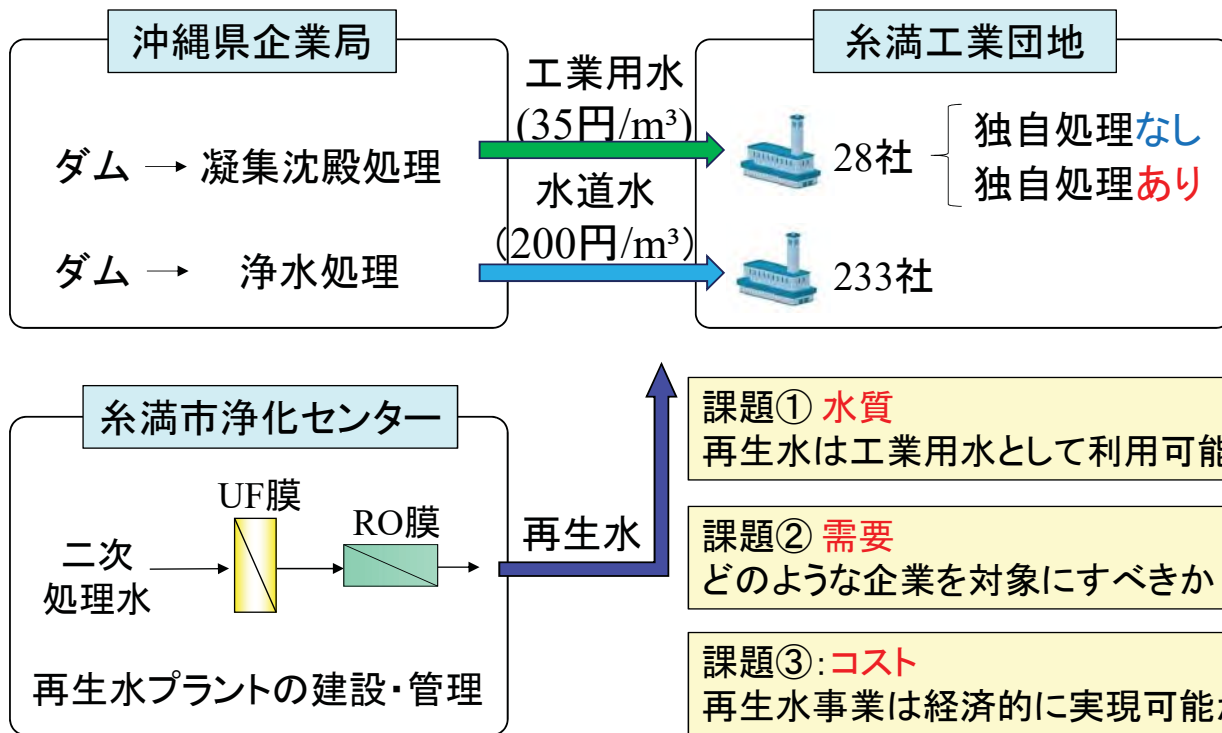


JA 直販所スタッフ

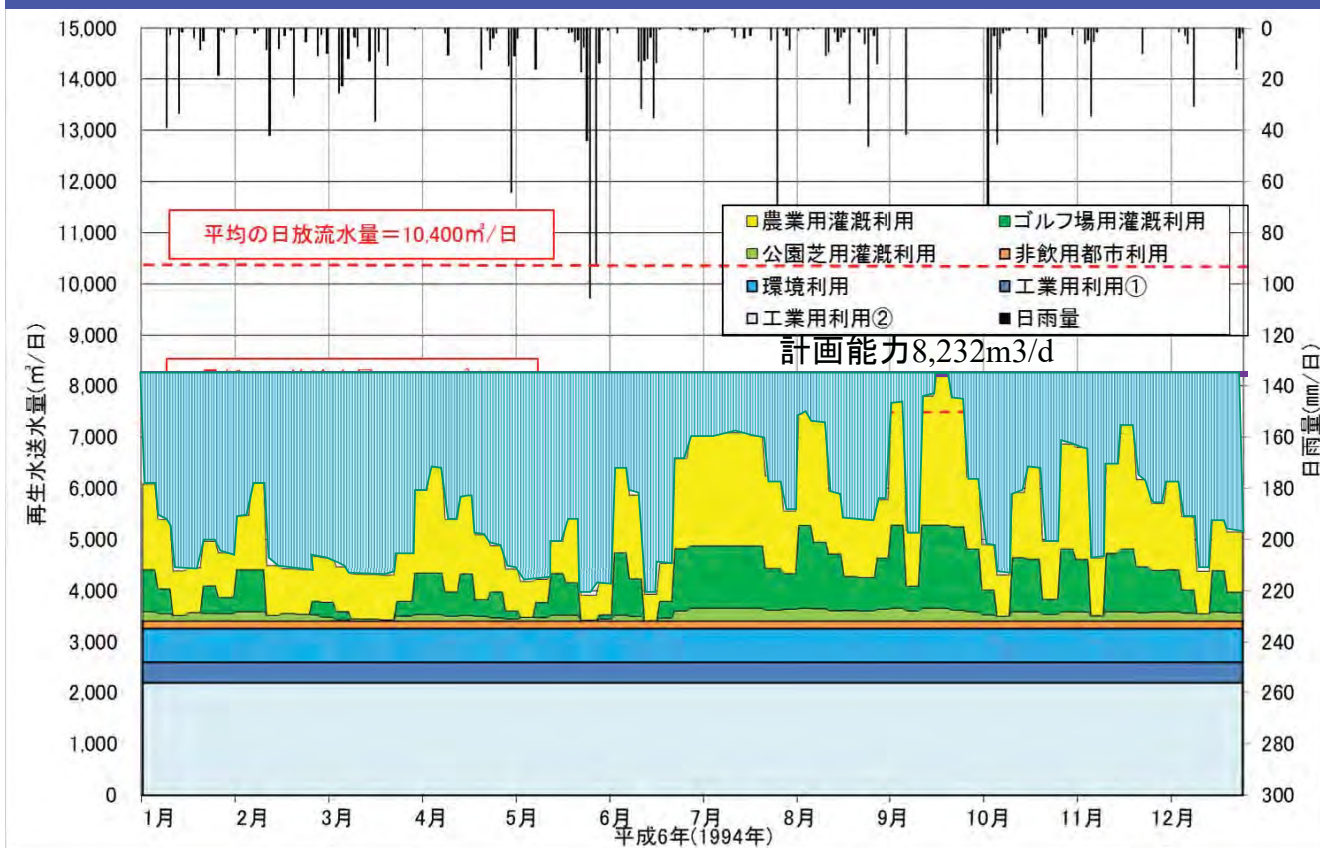
再生水のメリット



需要増加する工業用水へ再生水供給の課題



糸満市再生水供給計画での水需要の季節変化





国際規格 ISO TC282 水の再利用へ 40

CREST成果の一部がリスク評価法
エネルギー評価法として既に発行



平成30年5月
ISO/TC282/SC3/WG1会議風景

結論

- ・ 水の再利用は、水資源管理、水環境管理、エネルギー管理などの視点から、世界的に重要
- ・ 日本での再生水の普及促進のためには、安全性の評価と再生水の再生・輸送のエネルギーコストの削減のトレードオフを解決する計画と技術が必要
- ・ CRESTプロジェクトの技術開発成果は再生水の普及に役立つ
- ・ 沖縄では、必要性・競争性のある再利用プロジェクトの実施が期待される
- ・ 再生水利用用途ごとの安全性評価方法と再生水技術のエネルギー評価方法、機能評価が国際規格化されてきている

Thank you for your attention !

42

This research “Development and Evaluation of Water Reuse Technologies for the Establishment of 21st century type Water Circulation System” was financially supported by JST CREST and B-DASH Project by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.

Why not visit Itoman City Water Reuse Project?

Contact: htanaka@biwa.eqc.kyoto-u.ac.jp

